

Дослідження енергетичних показників транспортних засобів з електричним приводом

Валерій Дембіцький

*Луцький національний технічний університет
м. Луцьк, Україна*

Стрімкий розвиток науки, впровадження екологічно чистих та енергоощадних технологій стали рушійними факторами для розвитку електричних та гібридних транспортних засобів. За даними сайту virta.global [1] у 2020 році світовий ринок легкових електромобілів досяг 10 млн шт., а до 2030 року в світі частка електромобілів, за різними сценаріями розвитку, становитиме від 7 до 30 % загальної кількості транспортних засобів. Діаграма, наведена на рисунку 1 демонструє суттєве зростання кількості електромобілів у світі протягом останніх трьох років.

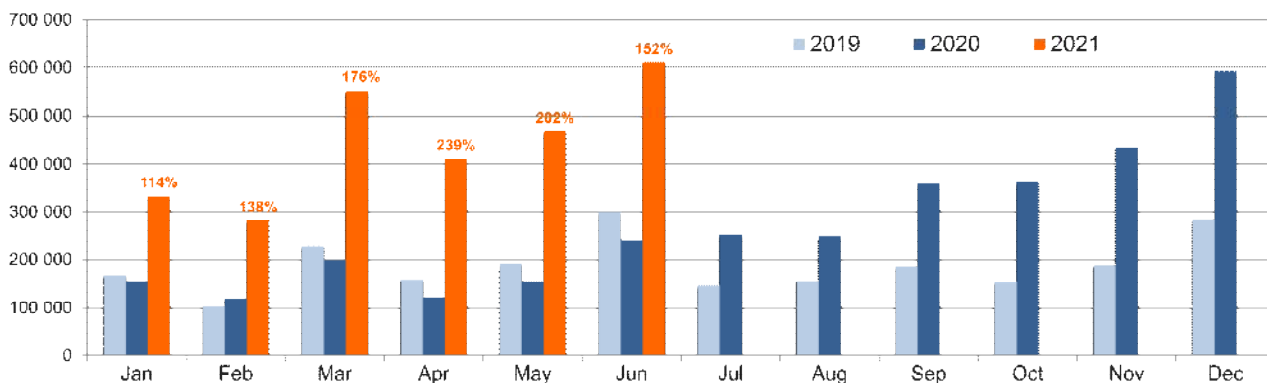


Рисунок 1 – Динаміка зростання світових продажів електромобілів (за даними [2])

Автомобільний ринок України також демонструє збільшення кількості електромобілів протягом останніх років. Станом на 01.03.2021 року в Україні офіційно зареєстровано більше 26 тис. електричних автомобілів [3], без врахування гібридних автомобілів. На рисунку 2 наведено кількість електромобілів в розрізі регіонів.

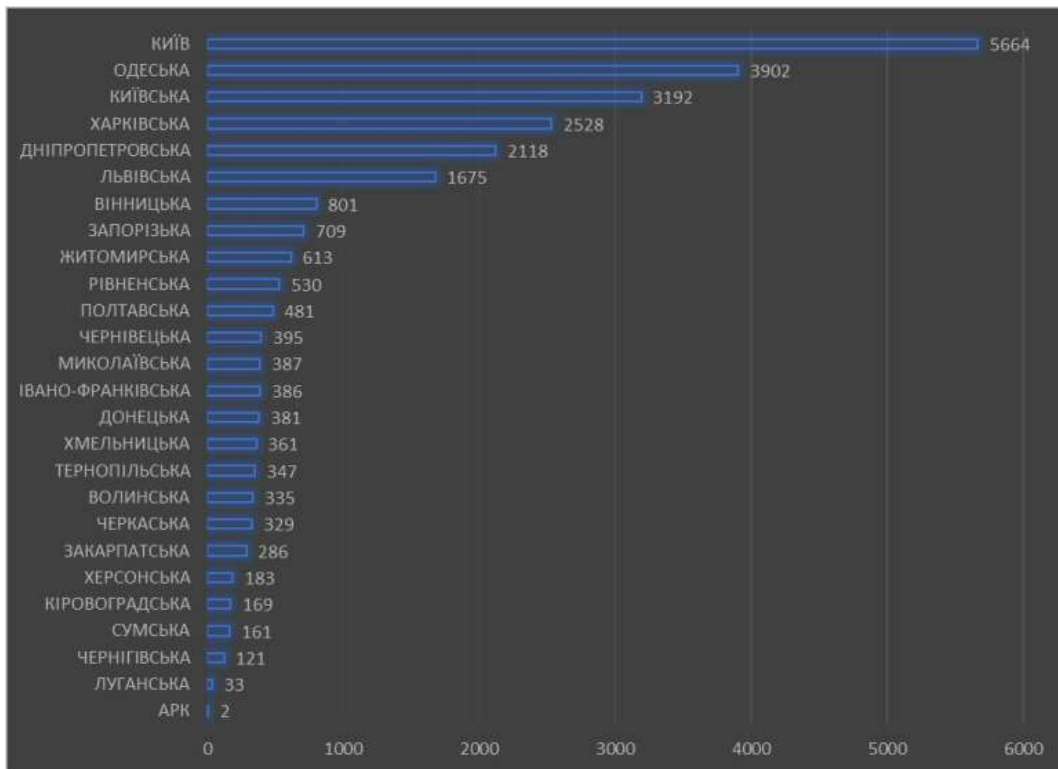


Рисунок 2 – Кількість електромобілів в регіонах України [3]

Компанія IRS Group прогнозує зростання ринку електричних та гібридних автомобілів в Україні до 2024 року до 246 тис. шт. [4] (рис. 4).

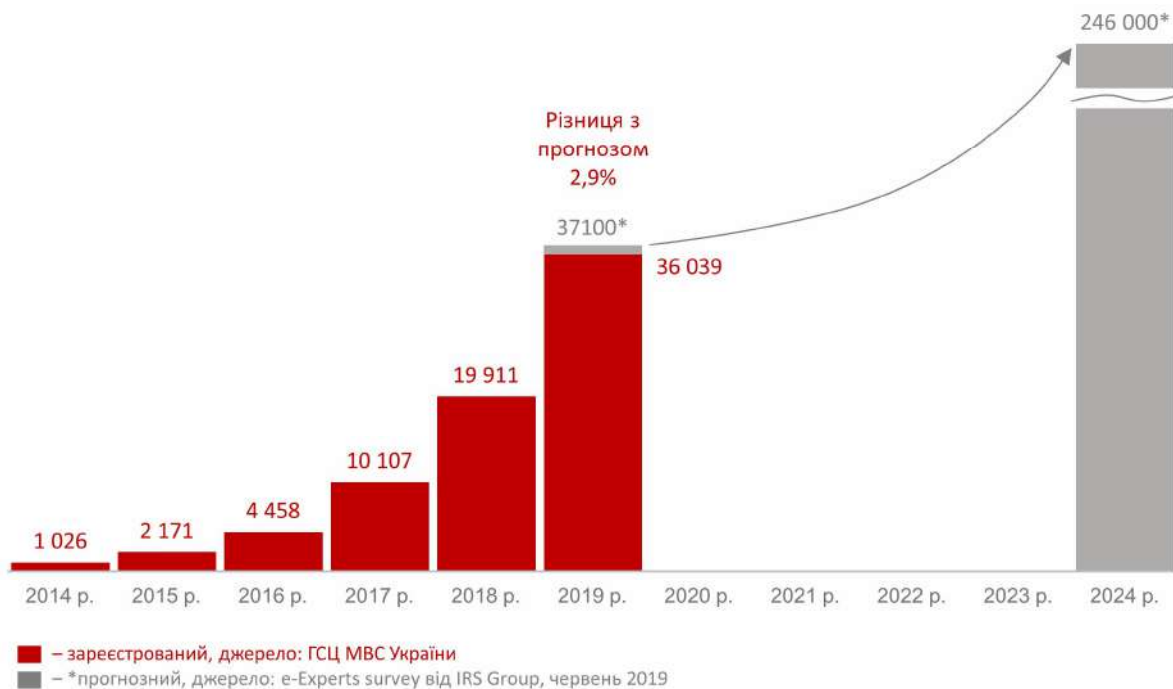


Рисунок 3 – Прогноз ринку електромобілів в Україні до 2024 року [4]

Зростання парку автомобілів з електричним приводом з однієї сторони призводить до необхідності розвитку відповідної інфраструктури, а з іншої потребує проведення відповідних досліджень з метою ефективного їх використання. Розвиток електромобілів супроводжується ґрунтовними дослідженнями пов'язаними із їх конструктивними, технологічними, експлуатаційними властивостями. Значна кількість присвячена дослідженням електричного приводу, управління електричним приводом [5–8]. Заслужують уваги дослідження витрат електричної енергії в реальних умовах експлуатації із врахуванням конструктивних особливостей транспортних засобів [9–13]. Саме витрати електричної енергії, та, відповідно, запах ходу, і є одним з визначальних показників для суб'єктів, які здійснюють експлуатацію автомобілів з електричним приводом.

Аналіз процесу експлуатації транспортного засобу дає можливість виокремити ряд факторів, які тим, чи іншим чином впливають на витрату електричної енергії транспортним засобом (рис. 4).

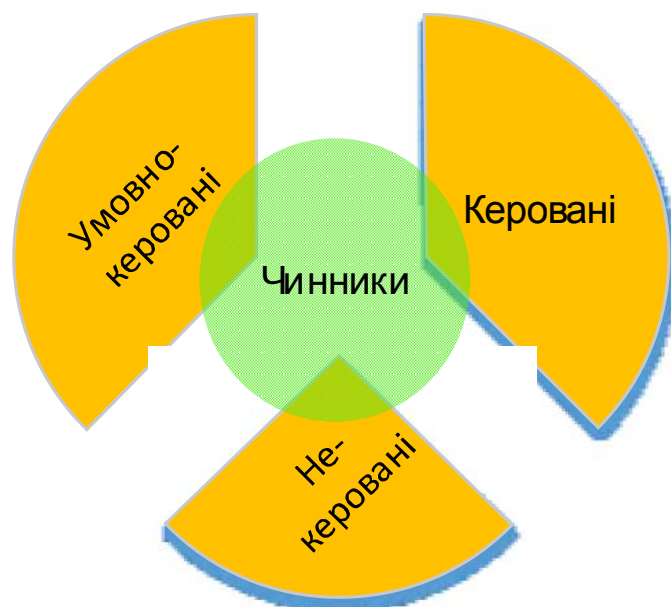


Рисунок 4 – Чинники, які впливають на енергоефективність транспортних засобів

Наведена на рисунку 4 схема впливу чинників на енергоефективність транспортних засобів відображає три їх категорії, які різняться за можливістю впливу на ці чинники та їх мінімізацію. Очевидним є той факт, що мінімізувати вплив зовнішніх умов, таких як кліматичні умови експлуатації, вплив вітру, профілю дороги і т.п. неможливо. Управління умовно-керованими факторами утруднене, через наявність певних обмежень. Сюди віднесено такі чинники як маршрут руху, конструктивні особливості транспортного засобу, швидкісний режим руху і т.п. Керованими факторами зручно управляти, оскільки вони повністю піддаються впливу: висока кваліфікація водія, раціональний вибір режимів руху призведе до неодмінного зменшення витрат електричної енергії. Варто зауважити, що вплив будь яких з цих чинників може бути як позитивним – коли вони сприяють зменшенню витрат електричної енергії так і негативним або нейтральним. Таким чином вплив зазначених груп факторів на витрату електричної енергії можна представити у вигляді математичної залежності:

$$F(E) = [F_k(E); F_n(E); F_{uk}(E)] \quad (1)$$

де $F_k(E)$ – підмножина впливу керованих факторів на витрату електричної енергії транспортним засобом;

$F_n(E)$ – підмножина впливу некерованих факторів на витрату електричної енергії транспортним засобом;

$F_{uk}(E)$ – підмножина впливу умовно-керованих факторів на витрату електричної енергії транспортним засобом;

$F(E)$ – загальна множина впливу факторів на витрату електричної енергії транспортним засобом.

Співвідношення між цими чинниками буде різним, залежно від типу транспортного засобу та умов його використання. У роботі [14] застосовано метод розробки експерименту (DoE) для дослідження статистичної значущості вибраних факторів ,які мають вплив на

витрату електричної енергії. Імітація реального використання здійснювалася на автомобілі Nissan LEAF, а витрата електричної енергії визначалася для різних умов використання транспортного засобу. Також дослідження впливу факторів на споживання електричної енергії здійснювалося у роботах [15 – 17]. Провівши аналіз наведених результатів досліджень, встановлено, що найбільш доцільним є застосовування основних положень теорії автомобіля.

Використовуючи класичні положення теорії експлуатаційних властивостей автомобіля, рух транспортного засобу описується рівнянням силового балансу [18 – 20]:

- для режиму розгону та руху з постійною швидкістю:

$$P_k = P_j + P_f + P_w \pm P_h \quad (2)$$

- для режиму гальмування

$$P_j = P_w + P_f + P_\tau \pm P_h, \quad (3)$$

де P_j – сила інерції транспортного засобу, Н;

P_f – сила опору руху, Н;

P_w – сила опору повітря, Н;

P_h – сила опору підйому, Н;

P_τ – гальмівна сила транспортного засобу, Н.

Сила інерції транспортного засобу визначається за залежністю:

$$P_j = j_a \cdot m_a \cdot \delta_r, \quad (4)$$

де j_a – прискорення транспортного засобу під час його розгону, м/с²;

m_a – маса транспортного засобу, кг;

$\delta_{об}$ – коефіцієнт врахування обертових мас транспортного засобу.

Сила опору руху транспортного засобу визначається за залежністю:

$$P_f = G_a \cdot f \cdot \sin \alpha \quad (5)$$

де G_a – вага транспортного засобу, яка рівна добутку його маси на прискорення вільного падіння, Н;

f - коефіцієнт опору кочення;

α – кут поздовжнього підйому (ухилу) дороги.

Сила опору повітря під час руху транспортного засобу визначається за залежністю:

$$P_w = k_w \cdot B \cdot H \cdot (V \pm V_e \cdot \cos \beta)^2, \quad (6)$$

де B – колія транспортного засобу, м;

H – максимальна висота транспортного засобу, м;

k_w – коефіцієнт обтічності транспортного засобу;

V – швидкість руху транспортного засобу, м/с;

V_e – швидкість вітру, м/с. Знак “плюс” ставиться, при попутному вітрові, а знак “мінус” – при зустрічному;

β - кут між напрямком вітру та поздовжньою віссю автомобіля.

Сила опору підйому під час руху транспортного засобу визначається за залежністю:

$$P_h = G_a \cdot \sin \alpha, \quad (7)$$

де α – кут поздовжнього підйому (ухилу) дороги.

Гальмівна сила транспортного засобу визначається за залежністю:

$$P_{\tau} = j_{\tau} \cdot m_a \cdot \delta_r, \quad (8)$$

де j_{τ} – сповільнення транспортного засобу під час гальмування, м/с².

Енергію, яка буде витрачена на рух транспортного засобу доцільно визначати за залежністю [21 – 24]:

$$E = \frac{A}{\eta_{\Sigma}} \quad (9)$$

Враховуючи (8), загальну витрату електроенергії доцільно визначати, як сума миттєвих витрат електричної енергії, на кожну секунду їздового циклу [25, 26]:

$$E_{\Sigma} = \sum_{i=1}^t E_{mi} = \sum_{i=1}^t \frac{A_{mi}}{\eta_{\Sigma}} \quad (10)$$

Тоді витрата електричної енергії транспортним засобом під час його руху становитиме:

$$E_{\Sigma} = \frac{1}{\eta_{\Sigma}} \cdot \int_0^t (P_k \cdot V) dt = \frac{1}{\eta_{\Sigma}} \cdot \int_0^t ((P_j + P_f + P_w \pm P_h - P_{\tau}) \cdot V) dt \quad (11)$$

Залежність (11) дає можливість визначити витрату електричної енергії транспортним засобом, який рухається певним маршрутом. Оскільки, як зазначалося вище, на витрату енергії автомобіля впливає ряд чинників, то доцільно їх розділити на групи, згідно рис. 4 (див. табл. 1)

Таблиця 1 – Чинники, які впливають на витрату електричної енергії транспортним засобом

Найменування параметра	Позначення	Характеристика параметра	Обґрунтування
Прискорення транспортного засобу під час його розгону	J_a	Умовно-керований параметр, керований параметр	Величина параметру залежить від професійних якостей водія, з врахуванням характеристик умов руху та дорожньої обстановки
Маса транспортного засобу	m_a	Некерований параметр	Зміна параметру неможлива, оскільки оптимальним є використання транспортного засобу з максимальним корисним навантаженням
Коефіцієнт врахування обертових мас транспортного засобу	$\delta_{об}$	Некерований параметр	Зміна параметра визначається виключно конструктивними особливостями транспортного засобу
Коефіцієнт опору кочення	f	Некерований параметр	Величина параметру залежить виключно від особливостей дорожнього полотна та умов експлуатації
Кут поздовжнього підйому (ухилу) дороги	α	Некерований параметр	Величина параметру залежить виключно від особливостей дорожнього полотна та умов експлуатації
Колія транспортного засобу	B	Некерований параметр	Величина параметру залежить виключно від конструктивних особливостей транспортного засобу
Максимальна висота транспортного засобу	H	Некерований параметр	Величина параметру залежить виключно від конструктивних особливостей транспортного засобу

Найменування параметра	Позначення	Характеристика параметра	Обґрунтування
Коефіцієнт обтічності транспортного засобу	k_w	Некерований параметр	Величина параметру залежить виключно від конструктивних особливостей транспортного засобу
Швидкість руху транспортного засобу	V	Умовно-керований параметр, керований параметр	Величина параметру залежить від професійних якостей водія, з врахуванням характеристик умов руху та дорожньої обстановки
Швидкість вітру	V_e	Некерований параметр	Виключно випадкова величина, яка залежить від природньо-кліматичних умов
Кут між напрямком вітру та поздовжньою віссю автомобіля	β	Некерований параметр	Виключно випадкова величина, яка залежить від природньо-кліматичних умов
Сповільнення транспортного засобу під час гальмування	J_τ	Умовно-керований параметр, керований параметр	Величина параметру залежить від професійних якостей водія, разом з тим визначальними є характеристики умов руху та дорожньої обстановки

З метою визначення внеску зазначених параметрів здійснено моделювання витрат електричної енергії транспортним засобом на визначеній ділянці руху. При цьому, враховуючи вищенаведене обґрунтування, прийнято, що $m_a = const$; $\delta_{об} = const$; $B = const$; $H = const$; $k_w = const$.

Діапазон зміни інших параметрів, вибрано наступний:

$$\left\{ \begin{array}{l} j_a \in [0...1,5] \text{ м/с}^2; \\ f \in [0,007...0,1]; \\ \alpha \in [-6...6]^\circ; \\ V \in [0...30] \text{ м/с}; \\ V_\theta \in [0...7] \text{ м/с}; \\ \beta \in [0...180] \text{ м/с}; \\ j_\tau \in [-3,0...0,0] \text{ м/с}^2. \end{array} \right. \quad (12)$$

Таким чином отримано вісім факторів, які мають вплив на витрату електричної енергії транспортним засобом. З метою дослідження внеску кожного чинника, визначено відповідні сили, які діють на транспортний засіб та встановлено частку впливу кожної з них (рисунок 5).

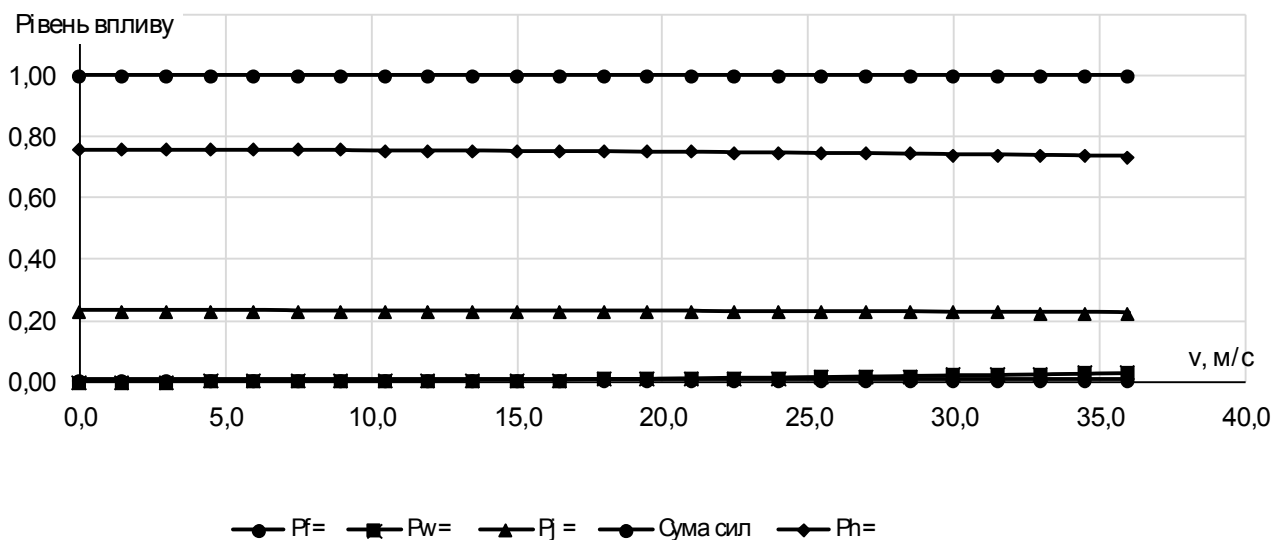


Рисунок 5 – Внесок чинників на витрату електричної енергії транспортним засобом

Тоді рівняння (10) можна записати у вигляді:

$$E_{\Sigma} = \frac{1}{\eta_{\Sigma}} \cdot \int_0^t ((k_1 P_{\Sigma} + k_2 P_{\Sigma} + k_3 P_{\Sigma} \pm k_4 P_{\Sigma} - k_5 P_{\Sigma}) \cdot V) dt \quad (13)$$

де де k_1, k_2, k_3 – коефіцієнти, які визначають внесок кожного фактора у витрату електричної енергії.

Тобто, витрата електричної енергії залежатиме від рівня внеску кожного фактора, за визначених умов руху. З іншої сторони, відповідно до таблиці 1 існує значна кількість некерованих чинників.

Враховуючи обґрунтування та дані, наведені в таблиці 1, оптимізації підлягає два фактори, швидкість руху транспортного засобу та прискорення. З метою спрощення задачі доцільно прискорення та сповільнення транспортного засобу об'єднати в одну величину:

$$j \in [-3, 0 \dots 1, 5] \text{ м} / \text{с}^2; \quad (14)$$

Однак враховуючи залежності (4) – (8) очевидним є той факт, що взаємоз'язок окремих параметрів досить значний, що унеможливило виокремлення одного з них та проведення відповідних досліджень.

Відомо, що в процесі експлуатації транспортні засоби рухаються, в основному у трьох основних режимах: розгону, постійного руху та гальмування [25]. В даному випадку режим руху автомобіля з вимкненим зчепленням або «вибігу» можна розглядати як режим гальмування, оскільки в даному режимі відбувається сповільнення автомобіля, а, за умови обладнання його системою рекуперативного гальмування категорії А, ще й рекуперация електричної енергії.

Тоді задача мінімізації витрат електричної енергії зводиться до вибору такого режиму руху, при якому кількість витраченої електричної енергії прямуватиме до мінімуму.

Тобто

$$E_{\text{ц}} = E_p + E_{\text{min}} - E_z \quad (15)$$

де $E_{\text{ц}}$ – енергія, витрачена на рух транспортного засобу за певним маршрутом або циклом;

E_p – енергія, витрачена на рух транспортного засобу в режимі розгону;

$E_{\text{ми}}$ – енергія, витрачена на рух транспортного засобу в режимі постійної швидкості;

E_2 – енергія, витрачена на рух транспортного засобу в режимі гальмування,

або

$$E_u = k_1 E_u + k_2 E_u - k_3 E_u \quad (16)$$

де k_1, k_2, k_3 – коефіцієнти, які визначають витрату електричної енергії у визначених режимах руху.

З метою здійснення розрахунків необхідно визначити можливі інтервали зміни коефіцієнтів k_1, k_2, k_3 при зміні чинників, визначених у залежності (12).

Під час моделювання витрат електричної енергії за основу прийнято стандартизований їздовий цикл, згідно EN 1987-1 [26, 27], наведений на рисунку 6.

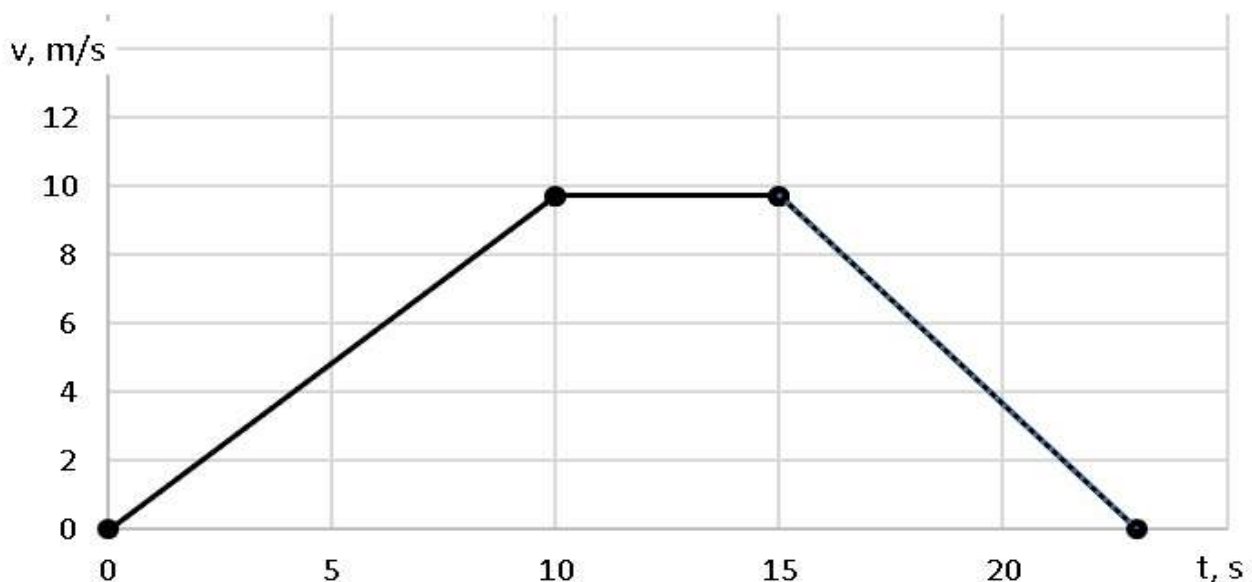


Рисунок 6 – Елементарний їздовий цикл згідно EN 1987-1.

Моделювання витрат електричної енергії здійснювалося для наступних умов руху:

- 1) нормальні умови руху, які відповідають умовам руху визначеним у EN 1987-1;
- 2) ідеальні умови руху, за яких усі зовнішні чинники сприяють мінімізації витрат енергії;
- 3) важкі умови руху, за яких усі зовнішні чинники призводять до максимальних витрат електричної енергії транспортним засобом.

Під час досліджень проведено 20 симуляцій для кожних із зазначених умов руху та визначено відповідні коефіцієнти k_1, k_2, k_3 , де k_1 – ваговий коефіцієнт для режиму розгону; k_2 – ваговий коефіцієнт, для режиму руху з постійною швидкістю; k_3 – ваговий коефіцієнт, для руху в режимі гальмування. Результати досліджень наведено у таблиці 2 та на рисунку 7.

Таблиця 2 – Результати моделювання витрат електричної енергії

Умови руху	Режими руху	Значення коефіцієнта впливу		
		Мінімальне	Максимальне	Середнє
Нормальні умови руху	Розгін	0,470	0,489	0,479
	Постійна швидкість	0,044	0,063	0,053
	Гальмування	-0,475	-0,461	-0,468
Важкі умови руху	Розгін	0,638	0,676	0,657
	Постійна швидкість	0,315	0,359	0,331
	Гальмування	-0,031	0,012	-0,012
Ідеальні умови руху	Розгін	0,160	0,236	0,208
	Постійна швидкість	0,070	0,097	0,081
	Гальмування	-0,743	-0,687	-0,711

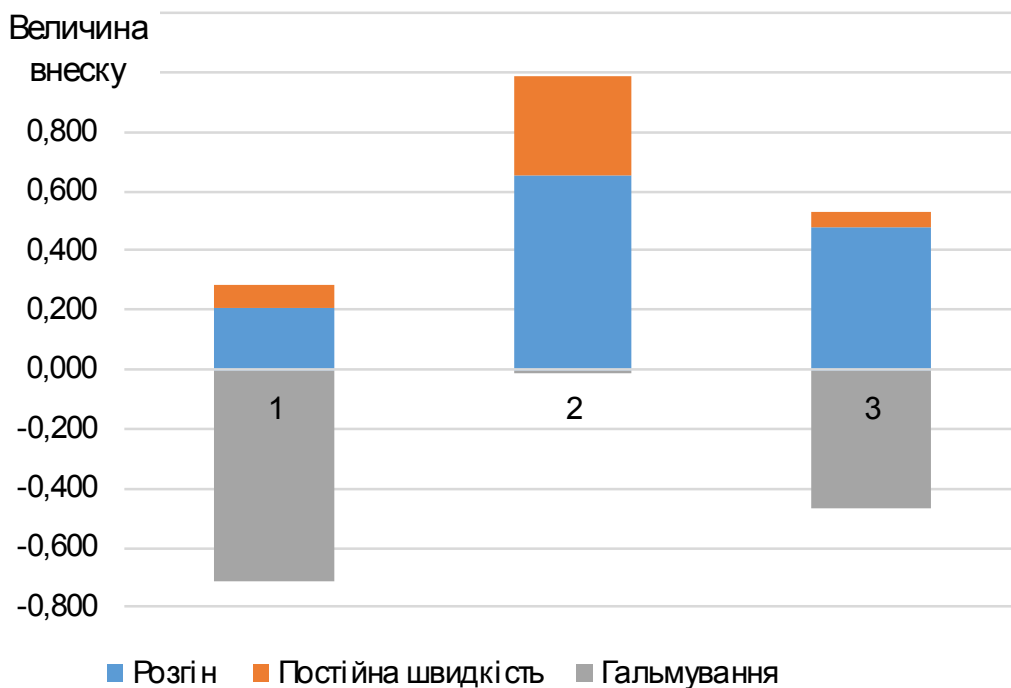


Рисунок 7 – Результати моделювання витрат електричної енергії для різних умов руху транспортного засобу

Виходячи з наведених результатів моделювання встановлено значний діапазон зміни коефіцієнтів, тому наступним кроком стало моделювання витрат електричної енергії за умови зміни усіх параметрів випадковим чином. Під час досліджень було здійснено 100 симуляцій та отримано наступні значення середні значення коефіцієнтів вагомості режимів руху:

$$k_1 = 0,587;$$

$$k_2 = 0,217;$$

$$k_3 = 0,196.$$

Для розрахунків, за основу взято елементарний їздовий цикл наведений на рисунку 6, тривалістю 23 с. Обсяг вибірки становить 100 симуляцій. Якщо привести кількість симуляцій до загальної тривалості їздового циклу, то його тривалість становитиме 2300 с, або 38 хвилин. Розрахунки проводилися для тролейбуса Т701, параметри якого наведено у таблиці 3.

Таблиця 3 – Характеристики транспортного засобу Богдан Т701.

Найменування показника	Модифікація тролейбуса
	Т 70110
Габаритна довжина по елементах кузова, мм	11960
Габаритна ширина, мм	2550
Габаритна висота, мм	3800
Колісна база, мм	5860
Колія передньої/задньої осей, мм	2160/1890
Пасажиромісткість, осіб	105
Порожня маса, кг	11800
Технічно допустима максимальна маса, кг	18940
Передавальне число головної передачі	9,82
Шини коліс	275/ 70R 22,5
Тиск у шинах, кгс/см ²	8,0

Використавши закон великих чисел, який стверджує, що середнє арифметичне значення скінченної вибірки близьке до математичного сподівання цього розподілу. Тому можна припустити, що при збільшенні тривалості руху транспортного засобу розподіл вагових коефіцієнтів режимів руху практично не змінюватимуться.

В такому випадку залежність (15) прийме вигляд:

$$E_{\text{ц}} = 0,587E_p + 0,217E_{\text{ни}} - 0,196E_{\text{з}} \quad (17)$$

Тобто, згідно залежності (17) 58,7 % витрати електричної енергії припадає на розгін транспортного засобу, 21,7 % – на рух з постійною швидкістю і 19,6 – на режими гальмування.

Досвід експлуатації тролейбусів у Польщі (м. Гдиня) доводить, що ефективним є зменшення часу руху транспортного засобу в режимі постійної швидкості, а натомість ефективно використовувати режим електродинамічного гальмування (рисунок 8).

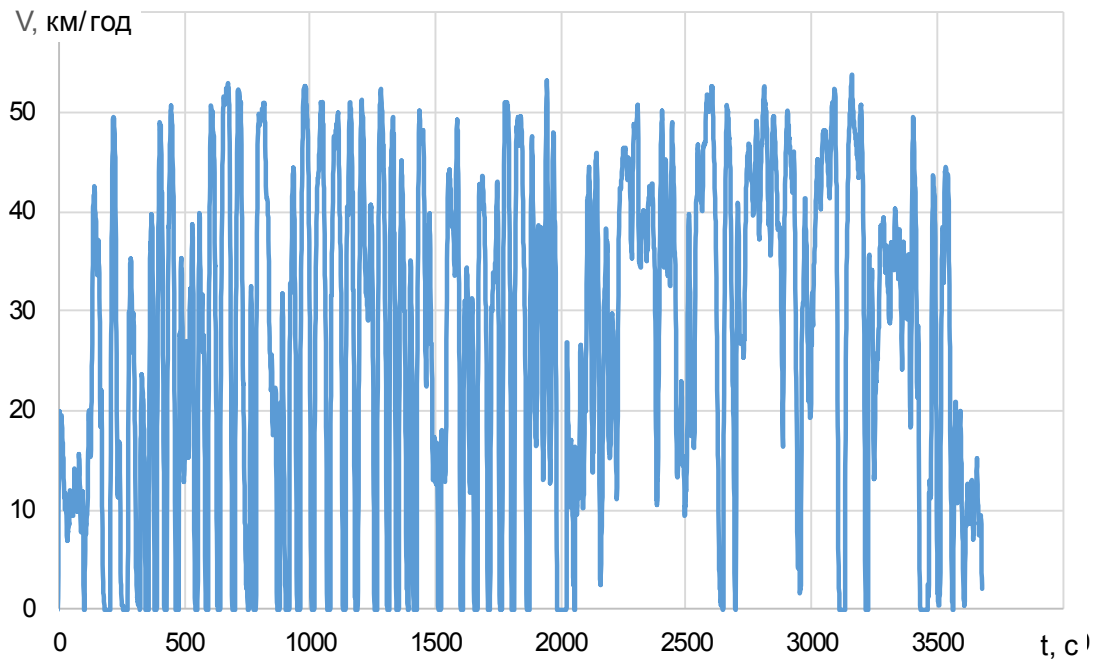


Рисунок 8 – Режими руху тролейбуса
в м. Гдиня (Республіка Польща)

При цьому розподіл режимів руху наступний:

- режим розгону – 42,6 %;
- режим руху з постійною швидкістю – 5 %;
- режим гальмування – 52,4 %;

а кількість рекуперованої енергії становить до 40 %.

Здійснюючи аналіз проведених досліджень відмічено, що з метою мінімізації витрат електричної енергії необхідно забезпечити оптимальний розподіл режимів руху. На рисунках 6 та 8 наведено відповідні режими руху транспортних засобів, однак проблема полягає в тому, що функція $V = f(t)$ є неінформативною з точки зору встановлення оптимальних режимів руху.

Оскільки в міських умовах руху, будь який транспортний засіб рухається в режимі «розгін-гальмування», то необхідно і доцільно розглядати функцію $V = f(S)$.

На першому етапі необхідно розглянути режим розгону. Витрати електричної енергії транспортного засобу в режимі розгону визначається за залежністю:

$$E_p = \frac{1}{\eta_{\Sigma}} \int_0^t (j_a \cdot m_a \cdot \delta_r + G_a \cdot f \cdot \sin \alpha + k_w \cdot B \cdot H \cdot (V \pm V_e \cdot \cos \beta)^2 \pm G_a \cdot \sin \alpha) \cdot V dt \quad (18)$$

Визначення витрат електричної енергії здійснюється на ділянці 200 метрів, при різних значеннях прискорення.

Відповідно до [28] прискорення транспортного засобу змінюється залежно від часу при різних заданих динамічних властивостях транспортного засобу (рисунок 9).

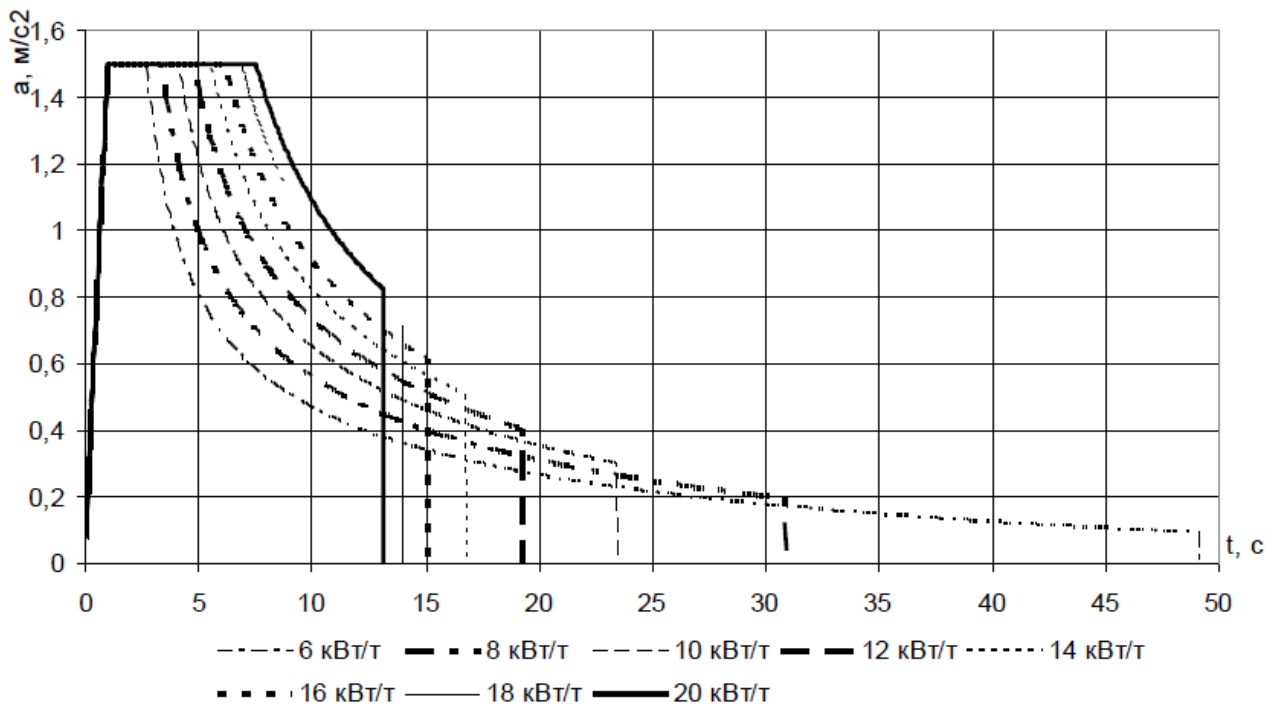


Рисунок 9 – Зміна прискорення транспортного засобу залежно від часу при різних заданих динамічних властивостях транспортного засобу [28]

Для тролейбуса Т701, при навантаженні 19 кВт/т, графік прискорення матиме вигляд, наведений на рисунку 10.

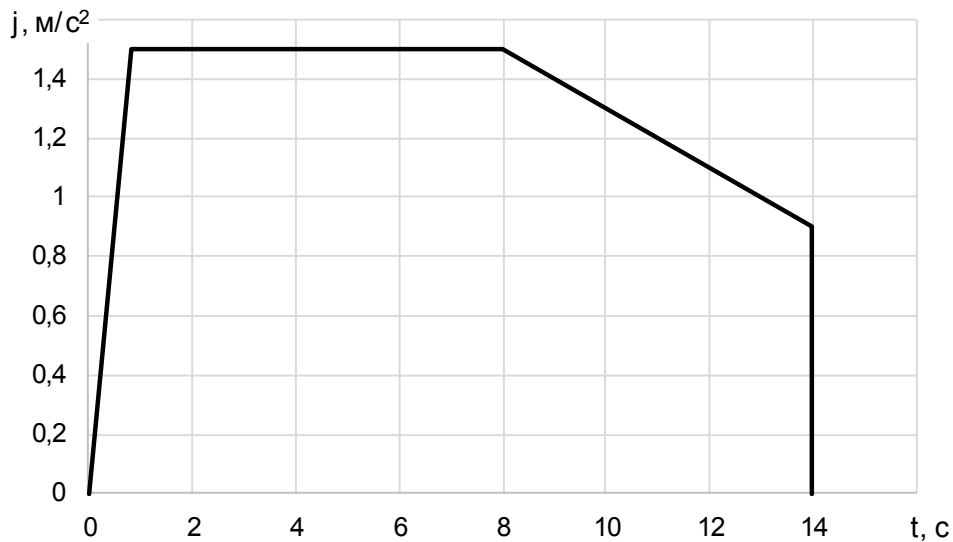


Рисунок 10 – Зміна прискорення тролейбуса Т701

За графіком прискорень, наведеним на рисунку 10 та за залежністю (18) визначено витрати електричної енергії за умови розгону транспортного засобу з різними прискореннями та побудовано відповідні графіки.

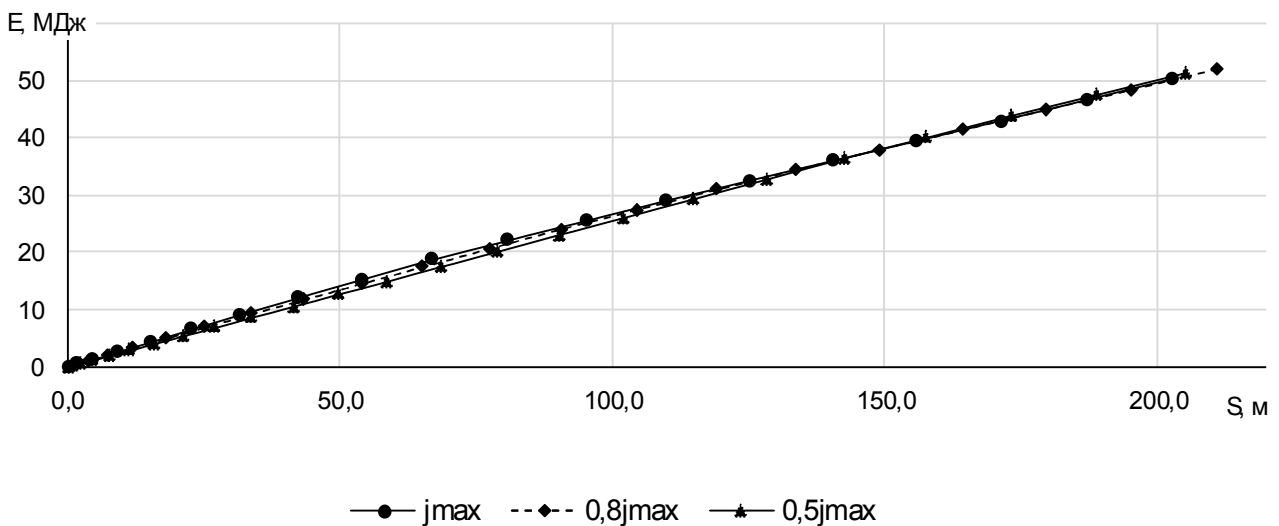


Рисунок 11 – Витрата електричної енергії тролейбусом Т701 під час розгону на ділянці 200 м, при різних значеннях прискорення.

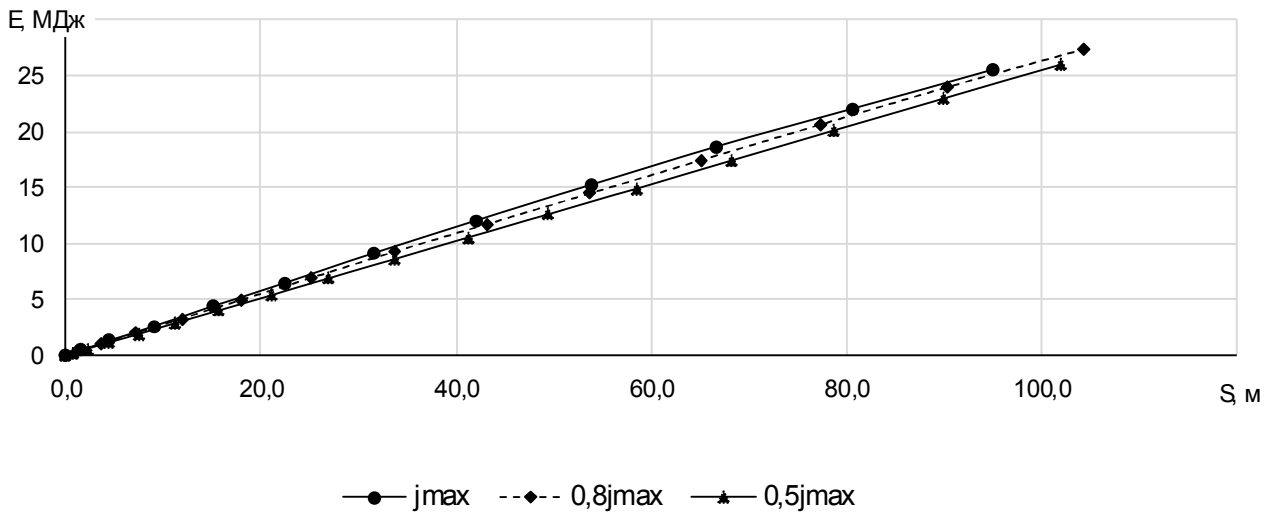


Рисунок 12 – Витрата електричної енергії тролейбусом Т701 під час розгону на ділянці 100 м, при різних значеннях прискорення.

На перший погляд може здатися, що здійснювати розгін на мінімальному прискоренні призводить до економії електричної енергії, однак необхідно враховувати, що рух транспортного засобу характеризується різними режимами, які між собою пов'язані.

Досить важливим у циклі руху є також режим гальмування оскільки застосування режиму гальмування призводить до накопичення електричної енергії, тому його ефективність має значний вплив на загальну витрату електричної енергії транспортним засобом.

Обсяг рекуперованої електричної енергії визначається за залежністю:

$$E_2 = \frac{1}{\eta_{\Sigma}} \int_0^t (((k_w \cdot B \cdot H \cdot (V \pm V_g \cdot \cos \beta))^2 + G_a \cdot f \cdot \sin \alpha + j_{\tau} \cdot m_a \cdot \delta_r \pm G_a \cdot \sin \alpha) V) dt \quad (19)$$

Аналогічним чином визначено обсяг рекуперованої електричної енергії тролейбусом Т701, при цьому значення усталеного сповільнення змінювалося від 1,0 до 0,5 м/с². Результати розрахунків у вигляді графіків, наведено на рисунку 13.

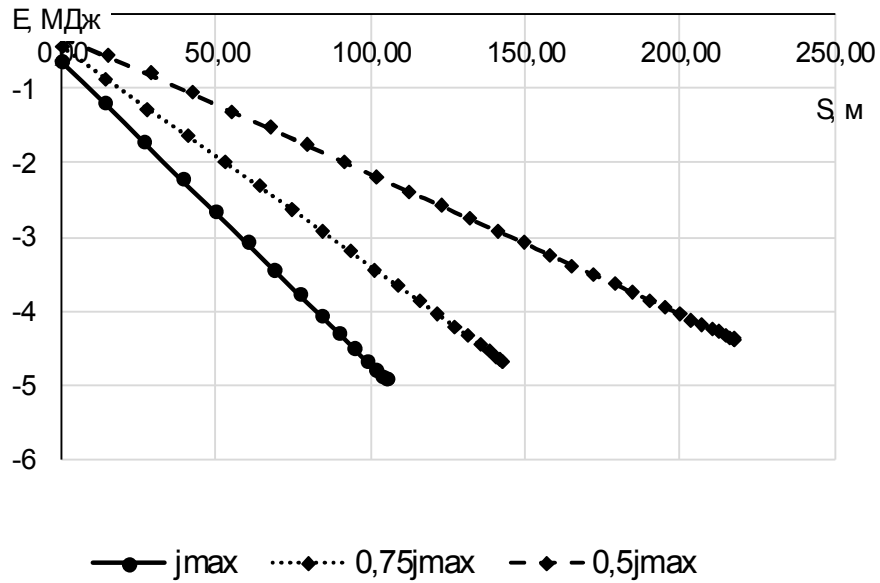


Рисунок 13 – Обсяг рекуперованої електричної енергії тролейбусом Т701 під час гальмування.

Як зазначалося вище, транспортний засіб рухається в режимі «розгін-гальмування» або в режимі «розгін-постійна швидкість-гальмування». Нижче на рисунках 14 – 16 наведено миттєву витрату електричної енергії транспортним засобом, який рухається в різних режимах.

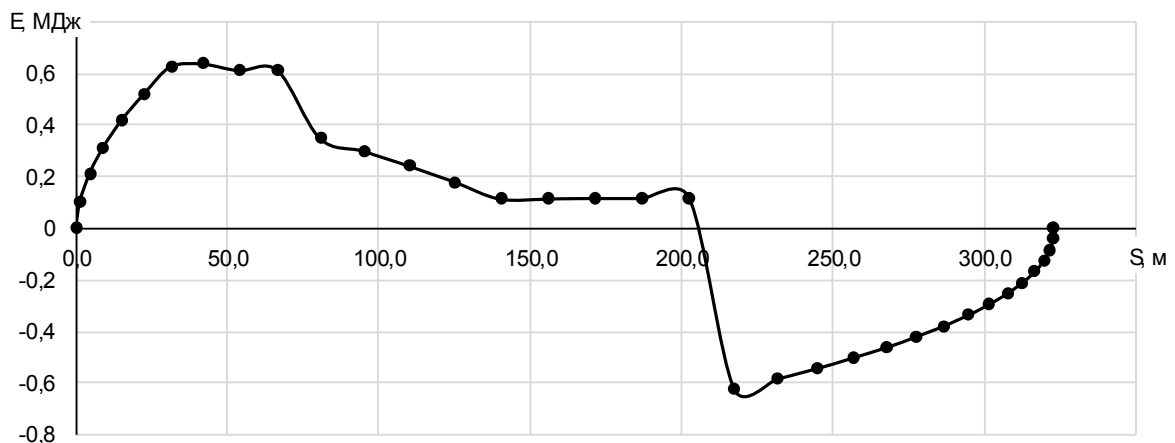


Рисунок 14 – Миттєва витрата електричної енергії транспортним засобом, який рухається без режиму постійної швидкості.

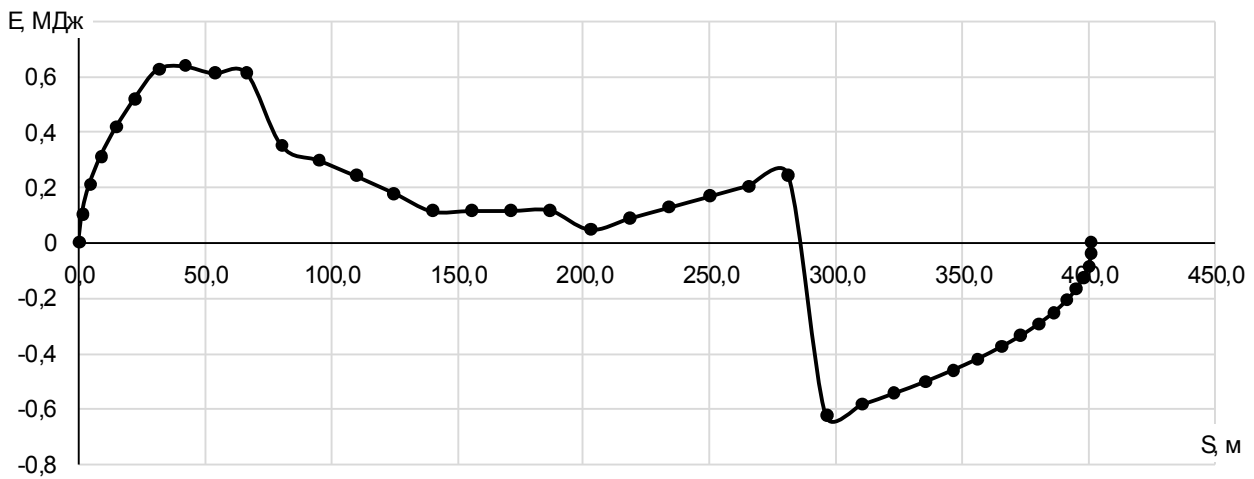


Рисунок 15 – Миттєва витрата електричної енергії транспортним засобом, який рухається в режимі постійної швидкості протягом 6 с.

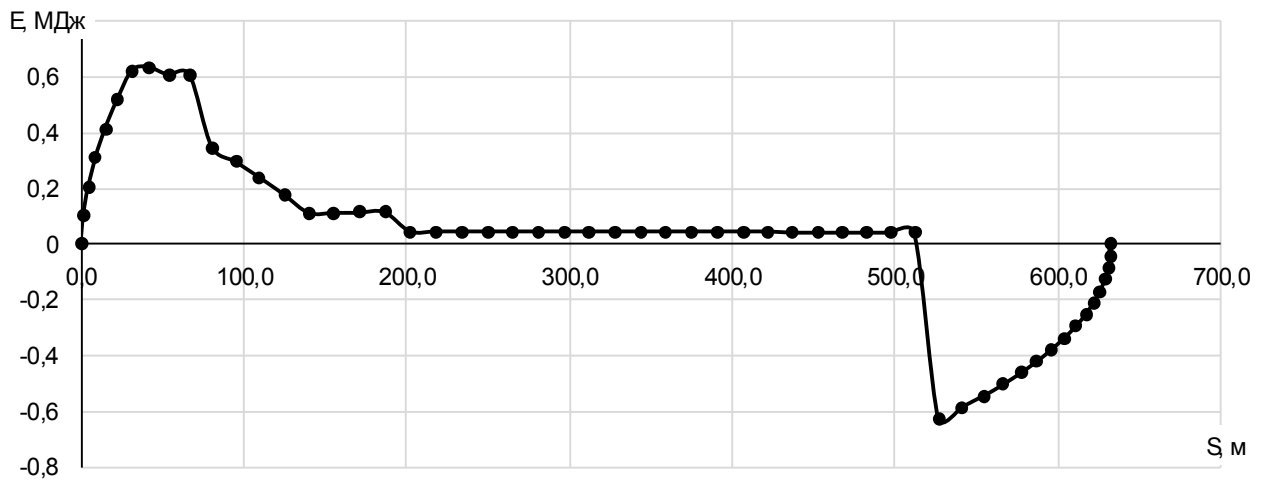


Рисунок 16 – Миттєва витрата електричної енергії транспортним засобом, який рухається в режимі постійної швидкості протягом 21 с.

Як видно з графіків застосування режиму постійної швидкості практично у 2 рази збільшує пробіг транспортного засобу, сумарна витрата енергії при цьому збільшується у 2,4 рази (рисунки 17 - 19).

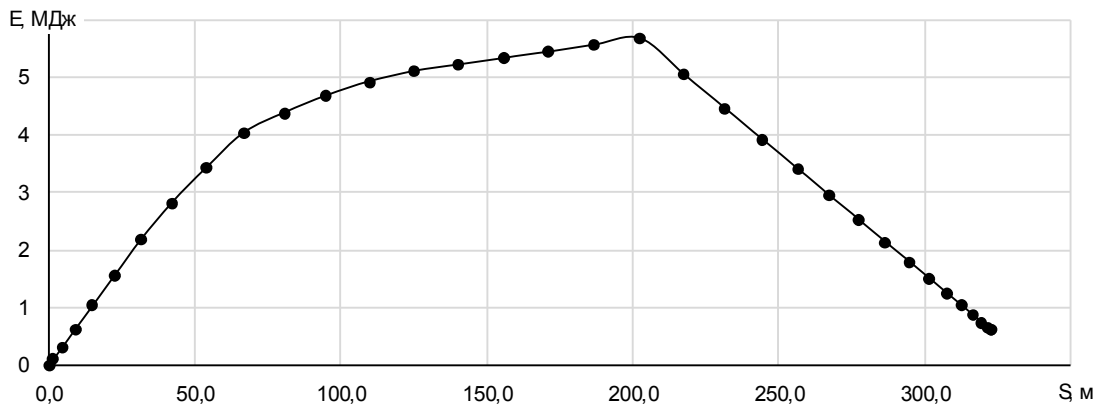


Рисунок 17 – Витрата електричної енергії транспортним засобом, який рухається без режиму постійної швидкості.

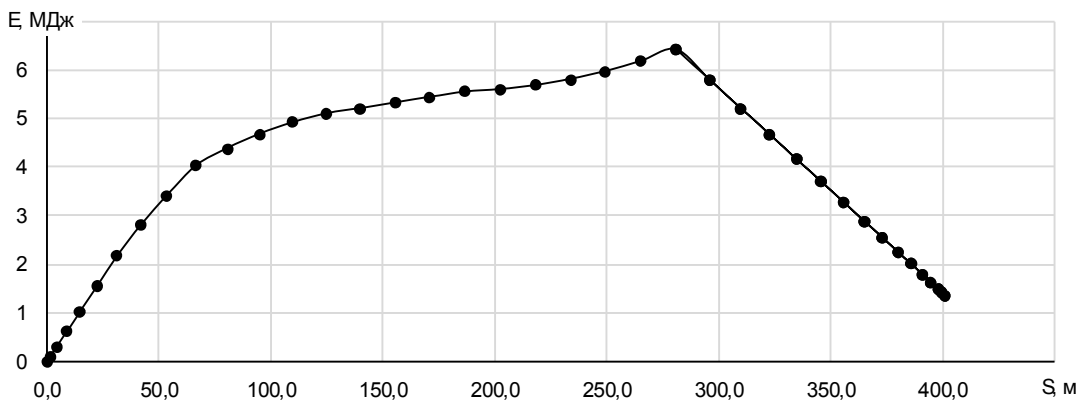


Рисунок 18 – Витрата електричної енергії транспортним засобом, який рухається в режимі постійної швидкості протягом 6 с.

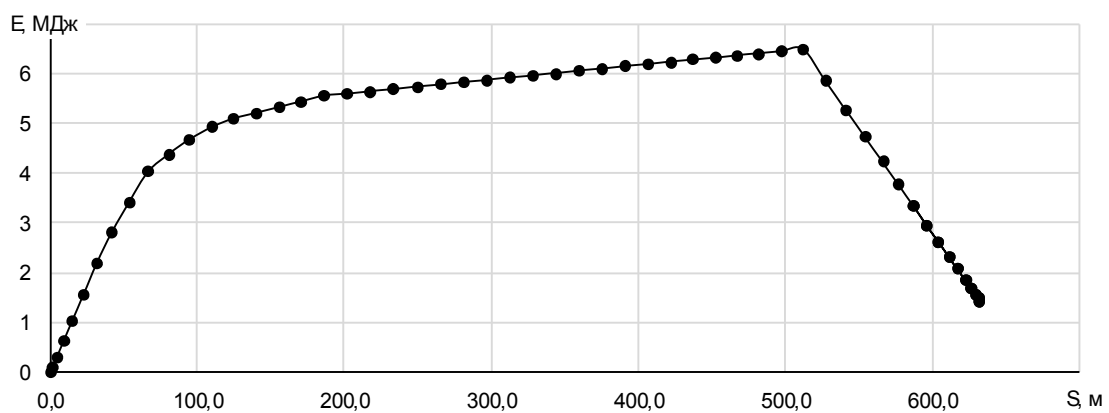


Рисунок 19 – Витрата електричної енергії транспортним засобом, який рухається в режимі постійної швидкості протягом 21 с.

Для визначення ефективності режиму руху доцільно привести витрати електричної енергії до питомого показника, тобто витрат на 1 км руху:

$$E_{num} = \frac{E_{\Sigma}}{l} \cdot 1000 \quad (20)$$

Таким чином транспортного засобу, який рухається без режиму постійної швидкості $E_{num} = 1,91$ МДж/км.

Для транспортного засобу, який рухається в режимі постійної швидкості протягом 6 с $E_{num} = 3,42$ МДж/км.

Для транспортного засобу, який рухається в режимі постійної швидкості протягом 21 с $E_{num} = 2,28$ МДж/км.

Нехай існує елементарний їздовий цикл, який складається з трьох режимів руху транспортного засобу: розгін, рух з постійною швидкістю і гальмування (рисунок 20). Якщо по осі x відкласти часовий проміжок, то цей показник лише задаватиме відповідний режим руху.

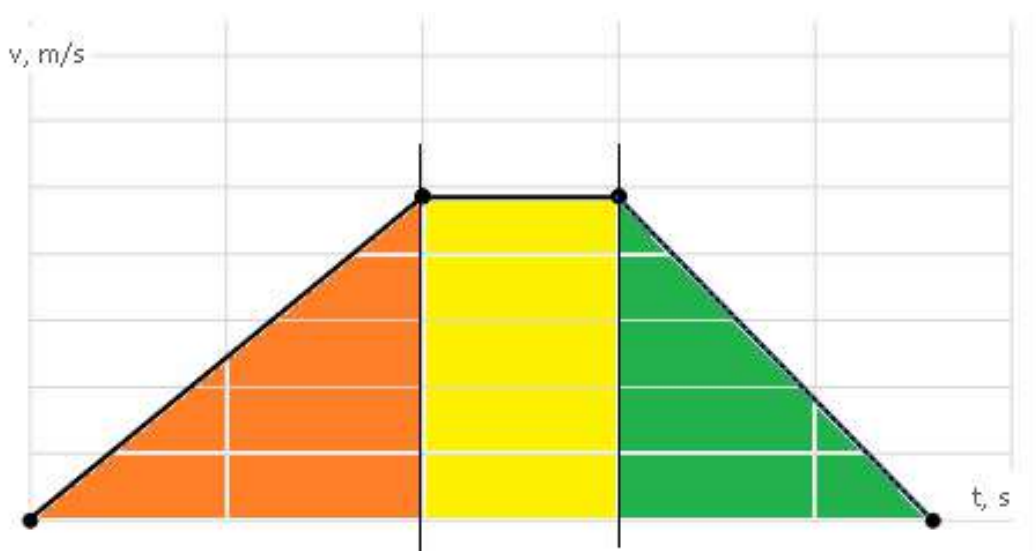


Рисунок 20 – Елементарний їздовий цикл.

Якщо по осі x відкласти пройдену відстань, то тоді можливим буде продемонструвати саме оптимальні режими руху транспортного засобу.

В умовах реальної експлуатації транспортних засобів ділянка дороги, яка уособлює елементарний їздовий цикл може значно відрізнятись від умов руху. Безумовно, якщо вести мову про експлуатацію транспортного засобу в міжміських умовах, то основний режим руху буде саме режим постійної швидкості. Деяка інша ситуація виникає в міських умовах руху, коли по маршруту наявні різноманітні перешкоди. Особливо варто відмітити автобуси, які рухаються міськими маршрутами, оскільки, які, окрім світлофорів, пішохідних переходів, перехресть та інших перешкод, під час руху зупиняються для посадки-висадки пасажирів.

Відповідно до ДБН Б.2.2-12:2018 «Планування і забудова територій» [29] відстань між зупинками громадського транспорту повинна становити в межах 400...600 м. Задача з моделювання руху транспортного засобу зводиться до визначення таких режимів руху, щоб мінімізувати витрати електричної енергії на даній ділянці маршруту.

Вирішення завдання пропонується здійснювати в кілька етапів. На першому етапі в режимах розгону та гальмування здійснюються на максимальних прискореннях (сповільненнях), відстань, яка залишиться повинна бути пройдена в режимі постійної швидкості руху. При цьому для розрахунків приймається максимальна швидкість 13,9 м/с, виходячи з допустимої Правилами дорожнього руху України швидкості руху в населеному пункті. Рух здійснюється до відстані 500 м. Результати моделювання наведено на рисунку 21.

Під час такого руху питомий коефіцієнт витрати електричної енергії становить 4,84 МДж/км. Елементарна ділянка їздового циклу наведена на рисунку 22.

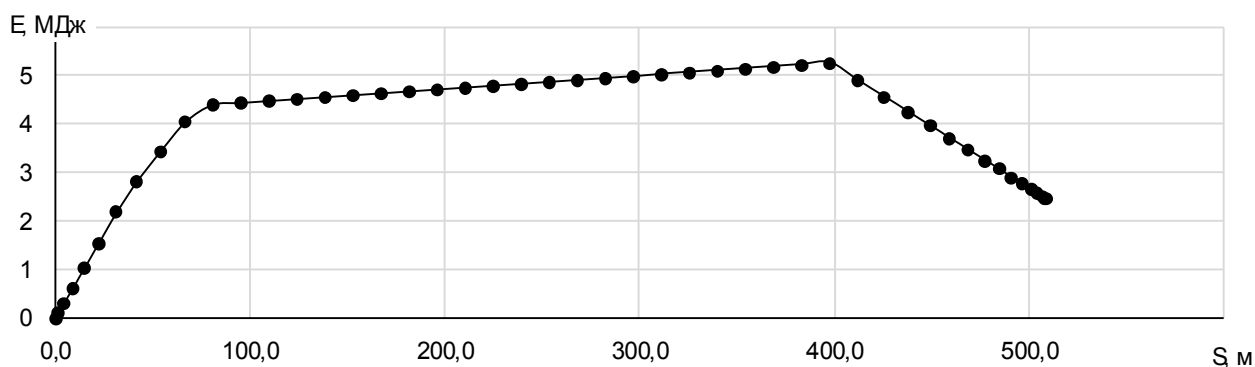


Рисунок 21 – Сумарні витрати електричної енергії транспортним засобом, під час руху на ділянці 500 м з максимальними прискоренням (сповільненням).

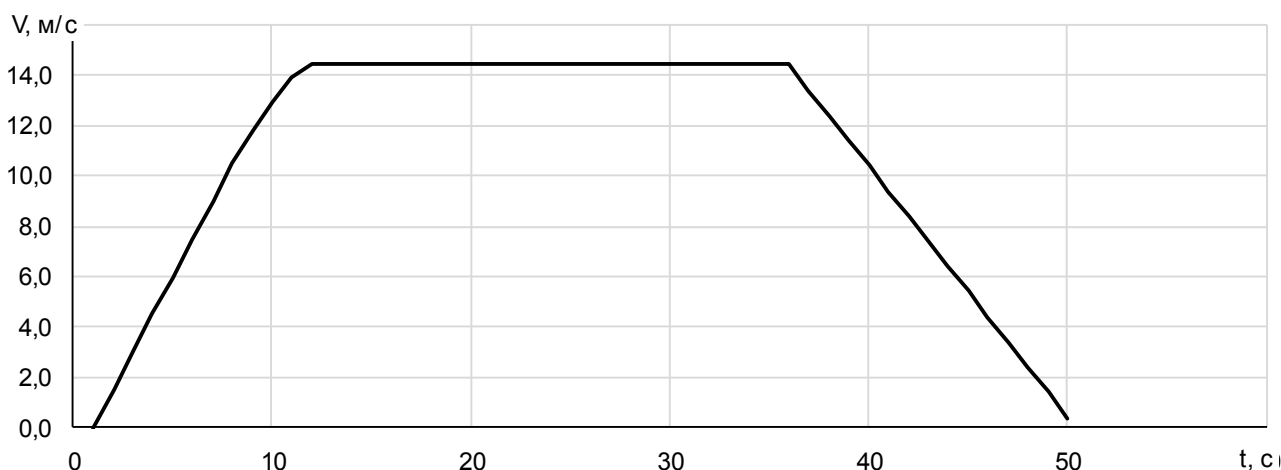


Рисунок 22 – Елементарна ділянка їздового циклу руху транспортного засобу на ділянці 500 м з максимальними прискоренням (сповільненням).

Аналіз даного режиму руху добре здійснювати за графіком миттєвої витрати електричної енергії, наведеним на рисунку 23.

Виходячи з графіка, наведеного на рисунку 23, доцільним є зменшення режиму постійної швидкості за рахунок режиму гальмування. При цьому сповільнення пропонується нарощувати по

мірі наближення до точки зупинки. Результати моделювання такого режиму руху наведено на рисунку 24.

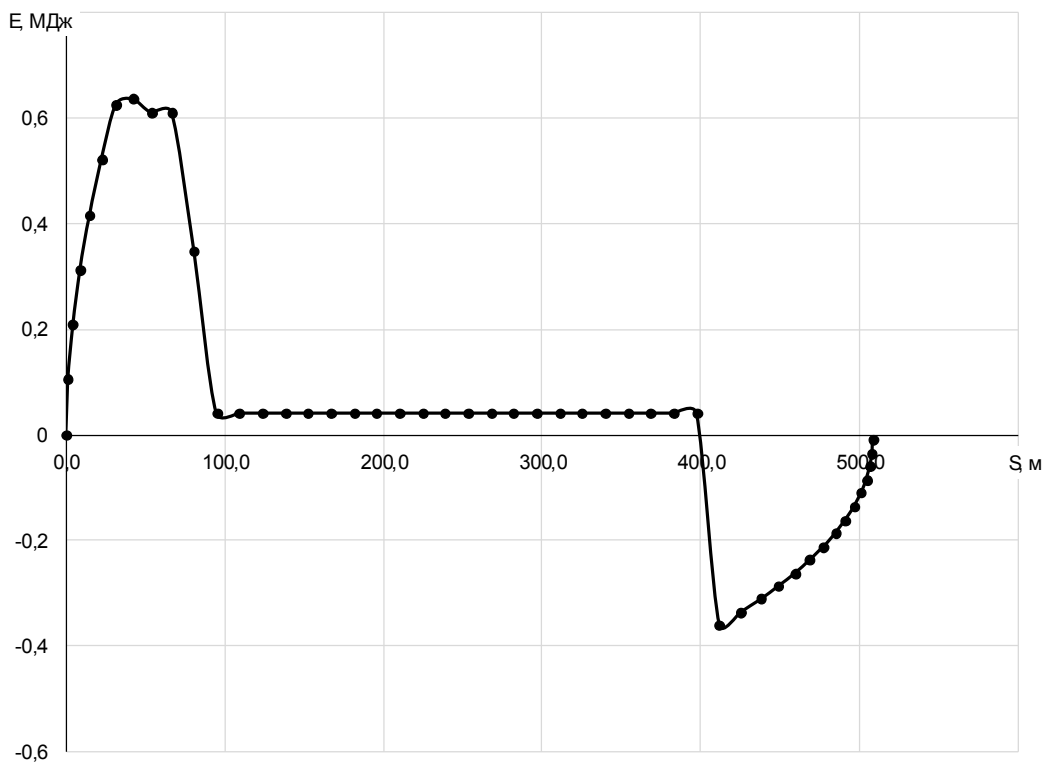


Рисунок 23 – Миттєві витрати електричної енергії транспортним засобом, під час руху на ділянці 500 м з максимальними прискоренням (сповільненням)

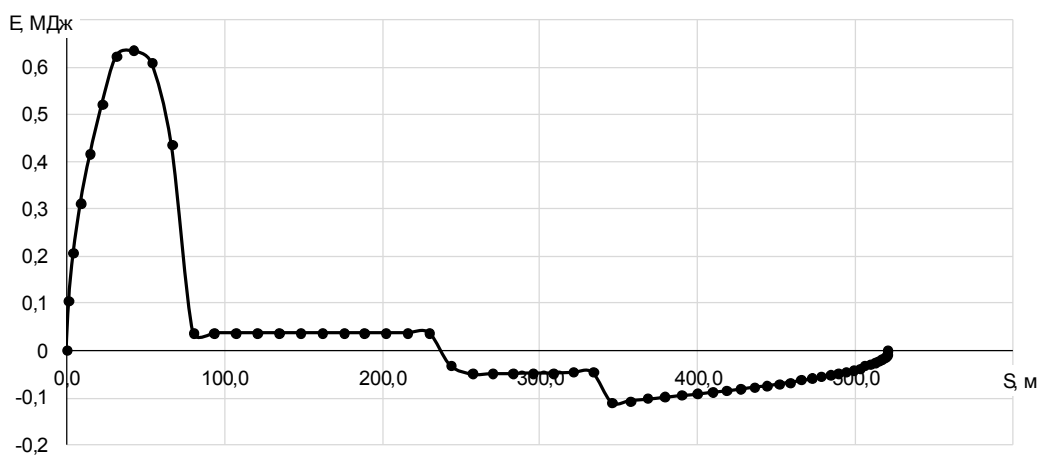


Рисунок 24 – Миттєві витрати електричної енергії транспортним засобом, під час руху на ділянці 500 м з максимальними прискоренням та мінімальним сповільненням.

В такому режимі руху питомий коефіцієнт витрати електричної енергії становить 4,22 МДж/км, а тривалість проходження ділянки елементарного їздового циклу – 63 с. Тобто збільшення часу руху становить близько 25 %, а зменшення питомого коефіцієнта витрати електричної енергії – на 16 %. Окрім того середня швидкість руху зменшилася на 20 % та становить 30,6 км/год.

Варто відмітити, що усі вищенаведені дослідження проводилися за умови рівного поздовжнього профілю опорної поверхні та відсутності впливу зовнішнього вітру.

Безумовно, що під час експлуатації транспортного засобу в реальних умовах на витрату електричної енергії впливатиме ряд зовнішніх факторів, зокрема сила та напрямок зовнішнього вітру та величина поздовжнього ухилу профілю дороги. Як зазначалося вище, ці фактори можуть мати як позитивний вплив на енерговитрати транспортного засобу так і негативний, тобто забезпечувати економію електричної енергії або її підвищену витрату.

З метою визначення впливу некерованих факторів, а саме зовнішніх умов, здійснено моделювання витрат електричної енергії, при випадковому впливі зазначених зовнішніх чинників.

Під час досліджень змодельовано 66 їздових циклів та визначено сумарні витрати енергії та питомий коефіцієнт витрати електричної енергії. Результати моделювання наведено на рисунках 25 - 27.

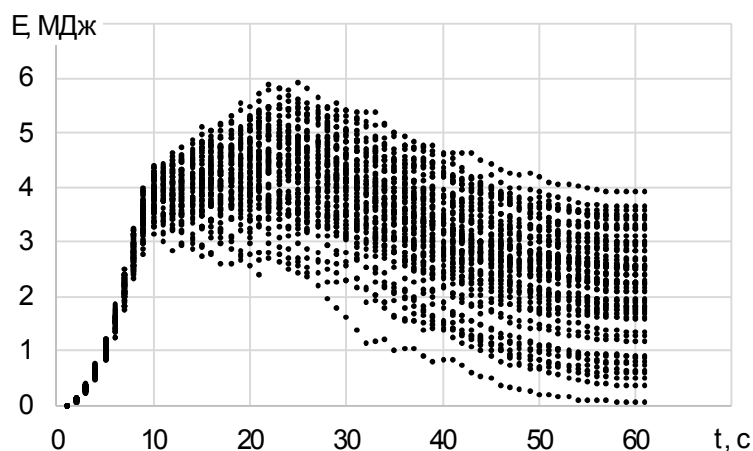


Рисунок 25 – Сумарні витрати електричної енергії транспортним засобом з врахуванням випадкового впливу зовнішніх чинників.

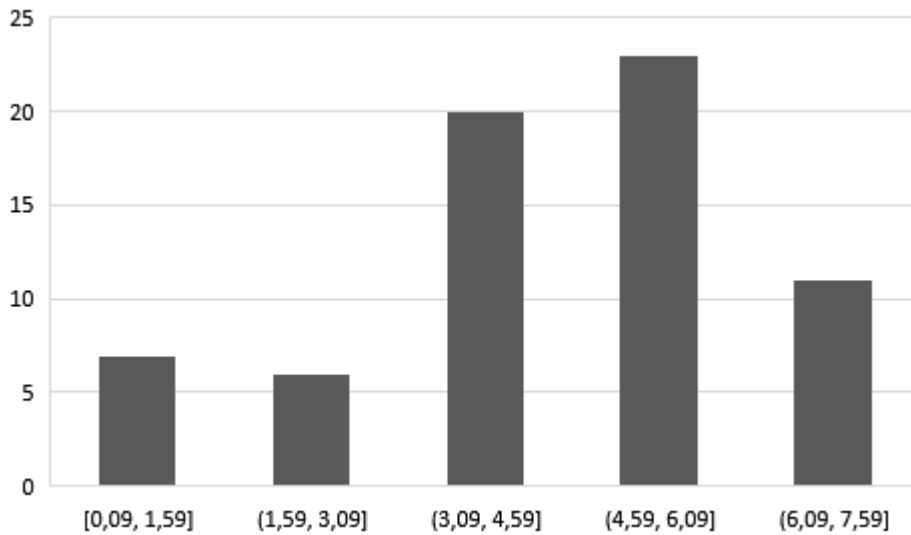


Рисунок 26 – Гістограма розподілу значень питомих коефіцієнтів витрат електричної енергії, з врахуванням випадкового впливу зовнішніх чинників.

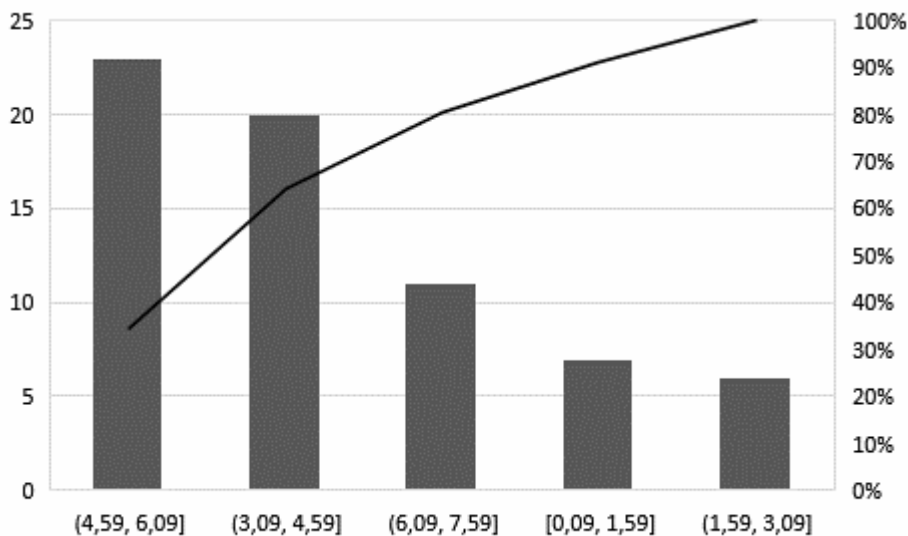


Рисунок 27 – Діаграма Парето розподілу значень питомих коефіцієнтів витрат електричної енергії, з врахуванням випадкового впливу зовнішніх чинників.

Аналізуючи наведені на рисунках 25 – 27 графіки, зважаючи на той факт, що визначений питомий коефіцієнт витрати електричної енергії, який для нормальних умов експлуатації становить 4,22

МДж/км може вважатися середнім значенням. При значенні питомого коефіцієнта витрати електричної енергії більше 4,22 МДж/км, можна констатувати факт негативного впливу зовнішніх чинників. При значенні питомого коефіцієнта витрати електричної енергії менше 4,22 МДж/км, можна констатувати факт позитивного впливу зовнішніх чинників:

$$\text{ідеальні умови} < k_E = 4,22 < \text{важкі умови} \quad (21)$$

Діаграма Парето (рисунок 27) демонструє, що 80 % значень питомого коефіцієнта витрати електричної енергії перебуває в діапазоні [3,09...6,09].

З метою перевірки адекватності отриманих теоретичних даних прийнято рішення здійснити їх порівняння з даними, отриманими в реальних умовах експлуатації.

Отримання достатньої кількості експериментальних результатів або даних по експлуатації транспортних засобів завжди є проблематичним з кількох причин:

- відсутність на транспортних засобах спеціалізованого устаткування, для реєстрації, збору та зберігання даних;
- відсутність необхідних даних в підприємств, які здійснюють експлуатацію транспортних засобів;
- заборона доступу до даних з боку підприємств, які здійснюють експлуатацію транспортних засобів;
- значні матеріальні, фінансові затрати під час збору таких даних, а також значні витрати часу.

Враховуючи ці фактори в рамках співпраці з м. Гдинею (Республіка Польща), було отримано дані по експлуатації тролейбусів в даному місті. Тролейбуси обладнані GPS-системами, які в режимі реального часу передають інформацію стосовно місця знаходження, швидкості руху витрати електричної енергії у диспетчерський центр. Для аналізу вибрано дані по експлуатації модифікації тролейбусів Solaris Trollino 12, характеристики яких наведено нижче, у таблиці 4.

Таблиця 4 – Характеристики транспортного засобу Solaris Trollino 12

Найменування показника	Модифікація транспортного засобу			
	Solaris Trollino 12T	Solaris Trollino 12AC	Solaris Trollino 12M	Solaris Urbino 12
Габаритна довжина по елементах кузова, мм	12000			
Габаритна ширина, мм	2550			
Габаритна висота, мм	2850...3490			2850...3035
Колісна база, мм	5900			
Пасажиромісткість, осіб	105			105...120
Порожня маса, кг	11440			10400...13000
Технічно допустима максимальна маса, кг	18000			

Для опрацювання отримано добові звіти по експлуатації 25 транспортних засобів, в різні дні. За отриманими даними визначено питомі коефіцієнти витрат електричної енергії в реальних умовах експлуатації в м. Гдиня, які мають наступні значення (МДж/км): 4,76; 5,09; 4,95; 4,52; 4,57; 4,73; 4,62; 4,97; 4,67; 4,83; 4,83; 4,60; 5,05; 5,27; 5,40; 4,75; 4,79; 4,72; 4,23; 5,11; 5,47; 4,60; 4,41; 4,52; 5,02. Середнє значення становить 4,82 МДж/км.

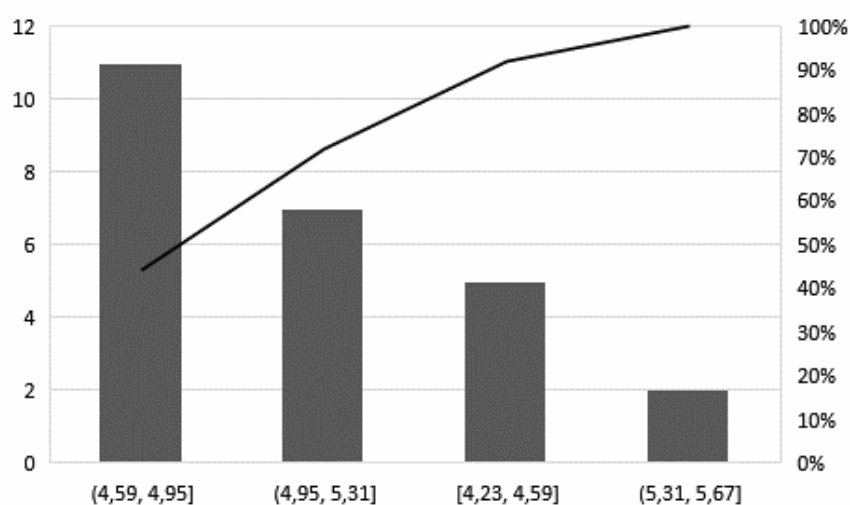


Рисунок 28 – Діаграма Парето розподілу значень питомих коефіцієнтів витрат електричної енергії в реальних умовах експлуатації в м. Гдиня

Для цих даних також побудовано діаграму Парето, яку наведено на рисунку 28.

Безумовно, що для коректного порівняння даних необхідно скоригувати значення питомого коефіцієнта витрати електричної енергії врахувавши масу транспортного засобу. Таким чином отримано наступні діапазони:

теоретичні значення за результатами моделювання:

$$k_E = [0,005...0,4] \frac{\text{МДж}}{\text{Т} \times \text{км}} \quad (22)$$
$$\bar{k}_E = 0,22 \frac{\text{МДж}}{\text{Т} \times \text{км}}$$

де \bar{k}_E – середнє значення показника;

за результатами реальної експлуатації транспортних засобу в м. Гдиня (Республіка Польща):

$$k_E = [0,23...0,30] \frac{\text{МДж}}{\text{Т} \times \text{км}} \quad (23)$$
$$\bar{k}_E = 0,27 \frac{\text{МДж}}{\text{Т} \times \text{км}}$$

Вузький діапазон значень питомого коефіцієнта витрати електричної енергії, визначеного за результатами експерименту зумовлений саме впливом зовнішніх чинників, зокрема позовжнім ухилом дороги та тим фактом, що експлуатація транспортних засобів здійснюється за встановленими маршрутами. З іншої сторони досить широкий діапазон питомого коефіцієнта витрати електричної енергії, визначеного теоретичним шляхом пояснюється широким діапазоном варіювання зовнішніх факторів, випадковим їхнім впливом та певною системною похибкою моделювання.

ВИСНОВКИ

Інтенсивний розвиток автомобільного транспорту з електричним приводом активізує відповідні дослідження. Одним з важливих показників ефективності експлуатації таких автомобілів є запас ходу та витрати електричної енергії. Для пересічного громадянина мабуть важливішим буде саме запас ходу на одній зарядці, а для підприємства, установи, організації саме витрати енергії. Великий інтерес дослідників та науковців до енергоефективності транспортних засобів підтверджується значною кількістю наукових публікацій. Саме аналізуючи проведені дослідження виявлено проблему пов'язану з визначенням витрат електричної енергії. На етапі конструювання, проектування та випробувань споживання енергії транспортних засобів моделюється, перевіряється та визначений показник вноситься у відповідні документи. Разом з тим під час експлуатації транспортних засобів в переважній більшості випадків спостерігається значно вища витрата електричної енергії, порівняно з тою, що зазначена виробником. Цей факт зумовлений рядом причин, зокрема:

- неможливістю врахування впливу зовнішніх чинників;
- відсутністю єдиного стандартизованого їздового циклу для визначення витрат електричної енергії;
- відсутністю єдиного підходу до встановлення нормативних значень витрат електричної енергії.

Наведені вище чинники сприяли проведенню відповідних досліджень. Для досліджень вибрано саме транспортні засоби, які здійснюють пасажирські перевезення за встановленими міськими маршрутами. Особливістю їх руху є часті режими розгону та гальмування, постійний рух за одними і тими ж маршрутами, що дає змогу ретельно дослідити режими руху та їх характеристики. За основу для досліджень взято тролейбуси, оскільки на сьогодні в Україні фактично не експлуатуються електробуси, а тролейбуси за своїм обладнанням та характеристиками максимально відповідають транспортним засобам з електричним приводом.

Виходячи з класичних положень теорії автомобіля визначено відповідні складові, які мають вплив на витрату енергії транспортним засобом. Ці складові детально проаналізовано та розподілено на три групи: керовані фактори, на які можна впливати під час руху транспортного засобу, умовно-керовані фактори, вплив на які утруднений проте можливий, некеровані фактори, вплив на які в умовах експлуатації неможливий. Виходячи з реальних даних становлено діапазон зміни (варіювання) цих чинників.

Дослідження впливу та внеску кожного з чинників є неможливим через значний взаємозв'язок їх між собою, а також двосторонній вплив на витрату електричної енергії, тобто кожен з чинників, залежно від конкретних умов може призводити як до підвищеної витрати електричної енергії так і до її економії.

Через це за основу було взято режими руху транспортного засобу на елементарній ділянці їздового циклу. Провівши 20 симуляцій для кожного з режимів руху: розгін, постійна швидкість, гальмування було визначено коефіцієнти впливу кожного режиму руху на витрату електричної енергії, при цьому було знехтувано впливом поздовжнього ухилу дорожнього полотна та зовнішнім вітром. Здійснюючи аналіз проведених досліджень відмічено, що з метою мінімізації витрат електричної енергії необхідно варіювати розподілом режимів руху.

Провівши подальші дослідження встановлено:

- найбільш доцільним є зменшення режиму руху з постійною швидкістю за рахунок режиму гальмування;
- розгін необхідно здійснювати з максимальним прискоренням;
- гальмування необхідно здійснювати в режимі мінімального сповільнення.

Здійснено моделювання руху транспортного засобу на ділянці дороги 500 м, при цьому забезпечивши найбільш вихідний розподіл режимів руху.

З метою приведення моделі до реальних умов руху було задано значення поздовжнього ухилу дорожнього полотна та зовнішнього вітру, які змінювалися випадковим чином в довільний момент часу.

Також визначено питомий коефіцієнт витрати електричної енергії. З метою порівняння отриманих результатів досліджень з експериментальними даними, питомий коефіцієнт витрати електричної енергії приведено до одиниці маси транспортного засобу.

Порівняння результатів проведених досліджень з експериментальними даними, отриманими в реальних умовах експлуатації транспортних засобів свідчить про задовільну збіжність показників. Коефіцієнт питомої витрати електричної енергії для теоретичних результатів становить $0,22 \text{ МДж}/(\text{т} \cdot \text{км})$, а для експериментальних даних – $0,22 \text{ МДж}/(\text{т} \cdot \text{км})$. Різниця між двома показниками становить близько 19 %. Отримане відхилення, зважаючи на значний діапазон впливу зовнішніх чинників та велику кореляційну залежність між собою факторів, які впливають на витрату електричної енергії можна вважати задовільним.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] <https://www.virta.global/global-electric-vehicle-market#nine>. The global electric vehicle market overview in 2021: statistics & forecasts. Електронний ресурс. Дата звернення 24.08.2021 р.
- [2] <https://www.ev-volumes.com>. Global EV Sales for 2021 H1. Електронний ресурс. Дата звернення 24.08.2021 р.
- [3] <https://itc.ua/news/chislo-zaregistrirovannyh-v-ukraine-elektromobilej-prevysilo-26-tys-shtuk>. Число зарегистрированных в Украине электромобилей превысило 26 тыс. штук. Електронний ресурс. Дата звернення 24.08.2021 р.
- [4] <http://irsgroup.com.ua>. Зареєстрований та прогнозований парк легкового та LCV електротранспорту (електромобілі та гібриди) в Україні. Електронний ресурс. Дата звернення 24.08.2021 р.
- [5] Stevic, Zoran & Radovanovic, Ilija. (2012). Energy Efficiency of Electric Vehicles. 10.5772/55237.
- [6] Avlasko, P & Antonenko, D. (2018). Automated complex for research of electric drives control. Journal of Physics: Conference Series. 1015. 032163. 10.1088/1742-6596/1015/3/032163.
- [7] Silaghi, Helga & Gamcová, Mária & Silaghi, Andrei & Spoială, Viorica & Alexandru Marius, Silaghi & Spoială, Dragoș. (2018). INTELLIGENT CONTROL OF ELECTRICAL DRIVE SYSTEM USED FOR ELECTRIC VEHICLES. The Scientific Bulletin of Electrical Engineering Faculty. 18. 10.1515/sbeef-2017-0015.
- [8] Zhao Y, Hou J, Wang C, Chen L, Sun Q. Design of vehicle control research and development platform for a pure electric vehicle. Advances in Mechanical Engineering. February 2019. doi:10.1177/1687814019826427.
- [9] Weiss, M., Cloos, K.C. & Helmers, E. Energy efficiency trade-offs in small to large electric vehicles. Environ Sci Eur 32, 46 (2020). <https://doi.org/10.1186/s12302-020-00307-8>.
- [10] Haakana A, Laurikko J, Granström R, Hagman R (2013) Assessing range and performance of electric vehicles in Nordic driving

conditions—End of Project Report. Nordisk Energieforskning, December 2013, pp 74. <https://docplayer.net/11036905-Assessing-range-and-performance-of-electric-vehicles-in-nordic-driving-conditions-project-final-report.html>.

- [11] Carlson R, Lohse-Busch H, Diez J, Gibbs J (2012) The measured impact of vehicle mass on road load forces and energy consumption for a BEV, HEV, and ICE vehicle. SAE International 2013-0-1457.
- [12] Helmbrecht M, Olaverri-Monreal C, Bengler K, Vilimek R, Keinath A (2014) How electric vehicles affect driving behavioral patterns. IEEE Intell Transp Syst Mag 6(3):22–32.
- [13] Zhao C, Gong G, Yu C, Liu Y, Zhong S, Song Y, Deng C, Zhou A, Ye H (2019) Research on key factors for range and energy consumption of electric vehicles. SAE Technical Paper 2019-01-0723, <https://doi.org/10.4271/2019-01-0723>.
- [14] Wen Li, Patrick Stanula, Patricia Egede, Sami Kara, Christoph Herrmann, Determining the Main Factors Influencing the Energy Consumption of Electric Vehicles in the Usage Phase, Procedia CIRP, Volume 48, 2016, Pages 352-357, ISSN 2212-8271, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.014>.
- [15] Sweeting, W. & Hutchinson, A. & Savage, S.. (2011). Factors affecting electric vehicle energy consumption. International Journal of Sustainable Engineering. 4. 1-10. 10.1080/19397038.2011.592956.
- [16] Miri, I, Fotouhi, A, Ewin, N. Electric vehicle energy consumption modelling and estimation—A case study. Int J Energy Res. 2021; 45: 501– 520. <https://doi.org/10.1002/er.5700>
- [17] Araan Mohanadass (April 1st 2020). Making the Most of the Energy We Have: Vehicle Efficiency, Intelligent and Efficient Transport Systems - Design, Modelling, Control and Simulation, Truong Quang Dinh, IntechOpen, DOI: 10.5772/intechopen.90602. Available from: <https://www.intechopen.com/chapters/70562>
- [18] Laurencas Raslavičius, Artūras Keršys, Rolandas Makaras, Management of hybrid powertrain dynamics and energy consumption for 2WD, 4WD, and HMMWV vehicles, Renewable and Sustainable

Energy Reviews, Volume 68, Part 1, 2017, Pages 380-396, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.109>.

- [19] Jazar, Reza N. Vehicle dynamics: theory and application. Springer, 2017.
- [20] Short, Michael, Michael J. Pont, and Qiang Huang. "Simulation of vehicle longitudinal dynamics." Safety and Reliability of Distributed Embedded Systems (2004): 04-01.
- [21] Yan, Qin & Zhang, Bei & Kezunovic, Mladen. (2014). Optimization of electric vehicle movement for efficient energy consumption. 2014 North American Power Symposium, NAPS 2014. 10.1109/NAPS.2014.6965467.
- [22] Dziubiński M, Drozd A, Adamiec M, Siemionek E.. Advances in Science and Technology Research Journal. 2017;11(4):27-34. doi:10.12913/22998624/78516.
- [23] Dziubiński, Mieczysław & Drozd, Artur & Adamiec, Marek & Siemionek, Ewa. (2017). Energy Intensity of the Electric Vehicle. Advances in Science and Technology Research Journal. 11. 27-34. 10.12913/22998624/78516.
- [24] De Cauwer, Cedric & Van Mierlo, Joeri & Coosemans, Thierry. (2015). Energy Consumption Prediction for Electric Vehicles Based on Real-World Data. Energies. 8. 8573-8593. 10.3390/en8088573.
- [25] DEMBITSKYI, V., SITOVS KYI, O., PAVLIUK, V. Influence of a system "vehicle - driver - road - environment" on the energy efficiency of the vehicles with electric drive. In: 1st International Scientific Conference ICCPT 2019: Current Problems of Transport: proceedings. SciView. 2019. p. 162-173.
- [26] Valerii Dembitskyi. (2021). Use of the Bezier Curves for a Vehicles Driving Cycles' Modeling. Communications - Scientific Letters of the University of Zilina, 23(1), B65-B75. <https://doi.org/10.26552/com.C.2021.1.B65-B75>.
- [27] EN 1987-1 Electrically propelled road vehicles - Specific requirements for safety - Part 1: On board energy storage.

- [28] Ярославцев М.В. Энергоэффективный тяговый привод городского безрельсового транспорта : учебное пособие / Ярославцев М.В., Щуров Н.И., Аносов В.Н.. — Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2017. — 136 с. — ISBN 978-5-7782-3274-7. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/91502.html>.
- [29] Планування і забудова територій. - К. : Мінрегіонбуд України, [2018] . - (Державні будівельні норми України). ДБН Б.2.2-12:2018. - Чинний від 2019-10-01. - К., 2018. - 177 с.